

4. Ширина зуба по окружности выступов. Если эта величина мала или вообще отрицательна, то приходится говорить о заострении зуба, которое в реальной зубчатой передаче не допустимо.

Ширина зуба по окружности выступов определяется по формуле

$$b_e = 2\left(\frac{\pi r}{z} - y_m\right), \quad (27)$$

где y_m – координата профиля зуба при $x = x_m$.

5. Коэффициент удельного скольжения.

$$\lambda_{ii} = \frac{V_1 - V_2}{V_i}, \quad (28)$$

где $i=1,2$. Значение V_i определяется производной $y'(x)$, если поверхность зуба описана в общем виде, или величиной $y'(t)/x'(t)$ при описании поверхности зуба в параметрическом виде.

6. Коэффициент полезного действия передачи определяется по формуле, приведенной в работе [2]:

$$\eta = 1 - \frac{f}{nr} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\cos \alpha_i}, \quad (29)$$

где l_i – полюсное расстояние, определяемое по (17), α_i – текущий угол зацепления, определяемый по (20); f – коэффициент трения скольжения в зацеплении; n – количество точек вычисления к.п.д. на рабочем участке.

7. Обеспечение выпукло-вогнутого контакта в зацеплении. Такой вид контакта значительно снижает контактные напряжения в зацеплении, для обеспечения чего выбирается значение коэффициента разновидности из условия [3]

$$k \leq z \sin 2\alpha_0 / 4, \quad (30)$$

Выводы. В статье приведены все необходимые формулы для определения качественных характеристик зубчатого зацепления и передачи в целом.

Список литературы: 1. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968. – 584с. 2. Павлов А.И. Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – 100с. 3. Павлов А.И. Контактное взаимодействие выпуклой и вогнутой поверхностей в зубчатом зацеплении // Вестник Харьковского национального технического университета "ХПИ". – Вып.10, т.2. – Харьков, 2002. – С.99-102.

Поступила в редколлегию 22.04.09

УДК 621.83:621.9.06

С.І. ПАСТЕРНАК, аспірант ІМВ ШУ, Штутгарт, Німеччина
Ю.М. ДАНИЛЬЧЕНКО, д.т.н., проф., зав. каф. ПМ НТУУ "КПІ", Київ, Україна
М.Г. СТОРЧАК, д.т.н., н.с. ІМВ ШУ, Штутгарт, Німеччина
А.В. КРИВОШЕЯ, к.т.н., с.н.с. ІНМ НАНУ, Київ, Україна

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОНТУРНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З ПЕРІОДИЧНИМИ ПРОФІЛЯМИ ДИСКОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Економически обосновано использование контурной обработки дисковыми фрезами для изготовления деталей с периодическими профилями. Для этого с помощью технико-экономического расчета определено себестоимость обработки деталей этим методом и проведено её сравнение с себестоимостью обработки традиционными методами.

A feasibility study of contour machining of parts with the periodic profiles by the disk-shaped milling cutters was conducted. For this purpose a first cost of part's machining was defined by technical-economical computation and was compared with the first costs of machining by the conventional methods.

Деталі з періодичними профілями – круглі і некруглі зубчасті колеса з різними профілями зубів, колеса зубчастих пасових передач, храпові колеса зірочки ланцюгових передач, шліцові вали і т.п. (таблиця 1) – входять в склад більшості машин і механізмів і у той же час є одними з найскладніших для виготовлення деталей. При одиничному та дрібносерійному типах виробництва, які в сучасних умовах всесвітньої економічної кризи і викликаної нею зупинки масового виробництва виходять на передній план і набувають неабиякої ваги, вартість виготовлення таких деталей традиційними методами – копіювання і обкату – є дуже високою. Це зумовлено застосуванням при цих методах обробки спеціального та конструктивно складного інструменту і/або спеціального обладнання.

Одним з рішень проблеми низько-затратного виготовлення деталей такого типу в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва є застосування при цьому простих і широко розповсюджених дискових фрез у поєднанні з кінематичними схемами, що забезпечують виготовлення коліс методом контурної обробки, і реалізуються з допомогою універсального обладнання (наприклад, оброблювального центру).

Про перспективність цього методу обробки вже неодноразово йшлося в літературі і доповідалося на конференціях [1-4]. Чимало було зроблено для теоретичного обґрунтування можливості його реалізації, включаючи розробку узагальненої математичної моделі процесу формування [2], математичне моделювання його кінематичних характеристик [3] і розрахунок продуктивності обробки [5]. Однак практично відсутня інформація щодо економічного ефекту від його практичного застосування для виготовлення деталей з періодичними профілями.

Таблиця 1 – Деталі з періодичними профілями

Зубчасті колеса з різними профілями				Некрутлі зубчасті колеса
Евольвентні	Циклоїдальні	Цівкові	Особливі	
				
Зірочки ланцюгових передач	Колеса зубчастих пасових передач	Храпові колеса	Шліцові вали	Кулачки та ін.
				

Тому наступним логічним кроком в дослідженні методу контурної обробки деталей з періодичними профілями дисковими фрезами є розрахунок економічного ефекту від його застосування у виробництві і відповідно визначення його місця серед інших методів обробки деталей такого типу.

Для прикладу, розрахуємо і порівняємо собівартість обробки деталей з періодичним профілем різними методами (обкату, копіювання і контурної обробки) (таблиця 2) в одному і тому ж оброблювальному центрі. Власне оброблювальному центру, як обладнанню для проведення обробки, було надано перевагу через те, що вони, з одного боку, є більш поширеними на малих машинобудівних підприємствах, ніж спеціальне обладнання, а з іншого боку, дозволяють реалізувати кожен з вибраних методів обробки і тим самим створити рівні умови для їх порівняння.


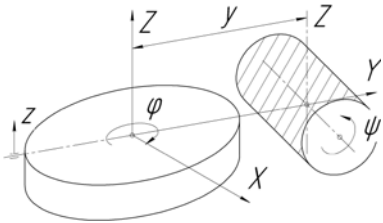

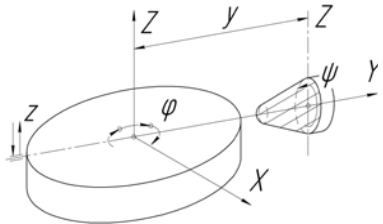

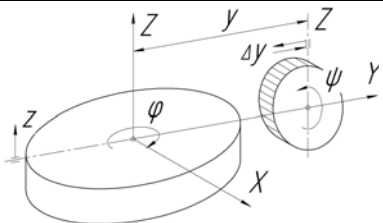

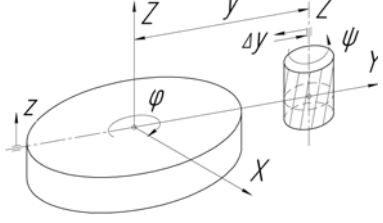
Технологічна собівартість операції металообробки може бути представлена у вигляді суми витрат трьох груп [6]:

$$C = C_A + C_B + C_V, \quad (1)$$

де C_A – витрати на заробітну плату, електроенергію і інструмент оснастку при виконанні технологічної операції, євро; C_B – витрати на амортизацію і ремонт універсального обладнання, утримання виробничих приміщень, євро; C_V – інші цехові, заводські і не виробничі витрати, євро.

Якщо при масовому виробництві усі затрати будуть безпосередньо залежати від норми часу t_j на операцію металообробки і розміру партії деталей P_n [6], то при одиничному і дрібносерійному виробництві витрати на інструмент будуть залежати від цих параметрів опосередковано, тому що, як

Таблиця 2 – Методи обробки деталей з періодичним профілем

№	Метод	Інструмент	Схема обробки
1	Обкат черв'ячними фрезами	 Фірма "Fette"	
2	Копіювання модульними фрезами	 Фірма "Fette"	
3	Контурна обробка дисковими фрезами	 Фірма "Alberg"	
4	Контурна обробка пальцевими фрезами	 Фірма "Alberg"	

для виготовлення пари зубчастих коліс з модифікованим профілем зубів, так і для виготовлення сотні, необхідно купувати спеціальний інструмент, ціна якого в обох випадках буде однаковою. Тому середня собівартість обробки однієї деталі в одиничному і дрібносерійному виробництві, виходячи з рівняння (1), запишеться у вигляді:

$$C = t_j (K_{зп} + K_{yz}) + \frac{q(C_{incj} + C_{oidj})}{P_n}, \quad (2)$$

де j – номер операції металообробки відповідно до номеру метода обробки в табл. 2, $j = 1 \dots 4$; t_j – норма часу на j -у операцію металообробки, яка визначається з основного часу обробки $t_j \approx 1,1 \cdot t_{oj}$, хв:

- для методу обкату (обробка черв'ячними фрезами) [7]:

$$t_{o1} = \frac{(l_{роб} + l_{вріз} + l_{пер}) \cdot z}{n \cdot S_o \cdot k_3}; \quad (3)$$

- для методу копіювання (обробка модульними фрезами) [7]:

$$t_{o2} = \left(\frac{(l_{роб} + l_{вріз} + l_{пер})}{S_m} + \frac{(l_{роб} + l_{вріз} + l_{пер})}{S_{зв.х.}} \right) \cdot z; \quad (4)$$

- для методу контурної обробки (обробка дисковими і пальчиковими фрезами) [8]:

$$t_{o3,4} = \left(\frac{l_{роб}}{S_m} + \frac{l_{шв}}{S_{шв}} \right) \cdot i_{np} \cdot z, \quad (5)$$

де $l_{роб}$, $l_{вріз}$, $l_{пер}$, $l_{шв}$ – відповідно довжина робочого ходу, врізання, перебігу та швидких ходів інструменту, мм; S_o – осьова подача інструменту, мм/об; S_m , $S_{зв.х.}$, $S_{шв}$ – хвилинні подачі робочого руху, зворотного ходу та швидких переміщень інструменту, мм/хв; n – частота обертання інструмента, об/хв; k_3 – число заходів фрези; z – кількість профілів деталі (для зубчастих коліс – кількість зубів); i_{np} – кількість проходів.

$K_{зпj}$ – норматив затрат на заробітну плату основних робітників при виконанні j -ї операції, який буде відрізнятися, в залежності від методу обробки, так як контурна обробка вимагатиме від робітника додаткового вміння використовувати САМ-програми для генерації кодів для системи ЧПУ, євро/хв; $K_{уз}$ – узагальнений норматив затрат груп Б і В, включаючи електроенергію, який буде однаковим для усіх чотирьох розглянутих методів обробки, євро/хв; $C_{інсj}$, $C_{відj}$ – вартість інструменту і його відновлення (переточування) при виконанні j -ї операції, євро; P_n – розмір партії оброблюваних деталей, шт; q – кількість інструментів необхідних для обробки усієї партії деталей,

$$q = \frac{P_n \cdot t_j}{T_j \cdot n_{відj}}, \quad q \in Z, \text{ шт},$$

де T_j – середня стійкість інструмента між відновленнями (переточуваннями), хв; $n_{відj}$ – максимальна кількість відновлень (переточувань).

При обробці деталей з різними періодичними профілями середня собівартість обробки однієї деталі визначається за формулою:

$$C_{сеп} = \frac{\sum_{i=1}^{k_{дем}} (C_i + C_{nni})}{k_{дем}}, \quad i \in Z, \quad (6)$$

де C_{nni} – вартість переналаштування верстату для обробки i -ї деталі, євро; $k_{дем}$ – кількість деталей з різними періодичними профілями.

Результати розрахунків за формулою (2) середньої собівартості обробки однієї деталі в одиничному і дрібносерійному виробництві різними методами представлені на рисунках 1 і 2. Причому на рисунку 1 представлено залежність ціни операції нарізання різними способами зубчастого колеса модулем $m = 7 \text{ мм}$, кількістю зубів $z = 20$ і шириною вінця $b_w = 15 \text{ мм}$ від розміру партії. А на рисунку 2 представлено залежність ціни операції обробки від

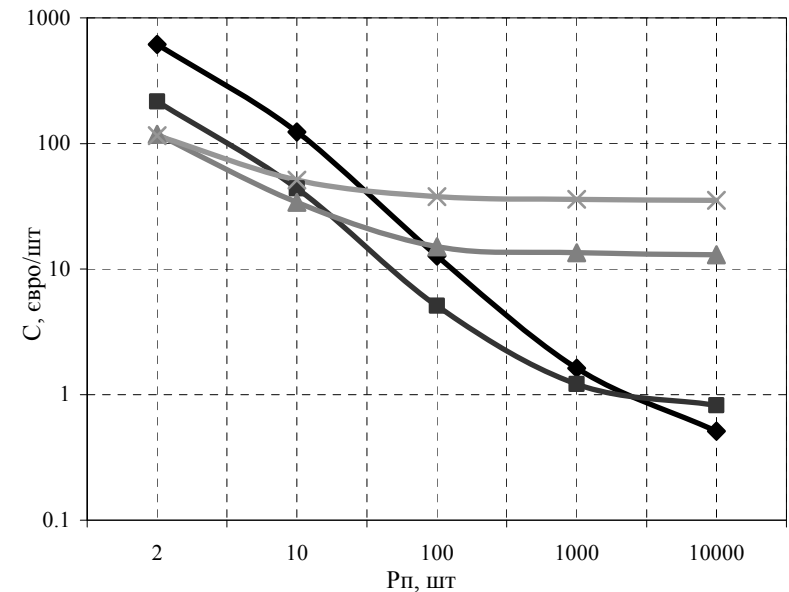


Рисунок 1 – Залежність собівартості зубообробки від розміру партії при різних методах обробки:
 ◆ – чорв'ячна; ■ – модульна; ▲ – дискова; × – пальцева фреза

ношення дільного діаметру зубчастого колеса $d_w = 140 \text{ мм}$ до ширини зубчастого вінця $b_w = 1..1000 \text{ мм}$ при одиничному $P_n = 2 \text{ шт.}$ (рис. 2, а) і дрібносерійних виробництвах $P_n = 10 \text{ шт.}$ і $P_n = 20 \text{ шт.}$ (рисунки 2, б і в).

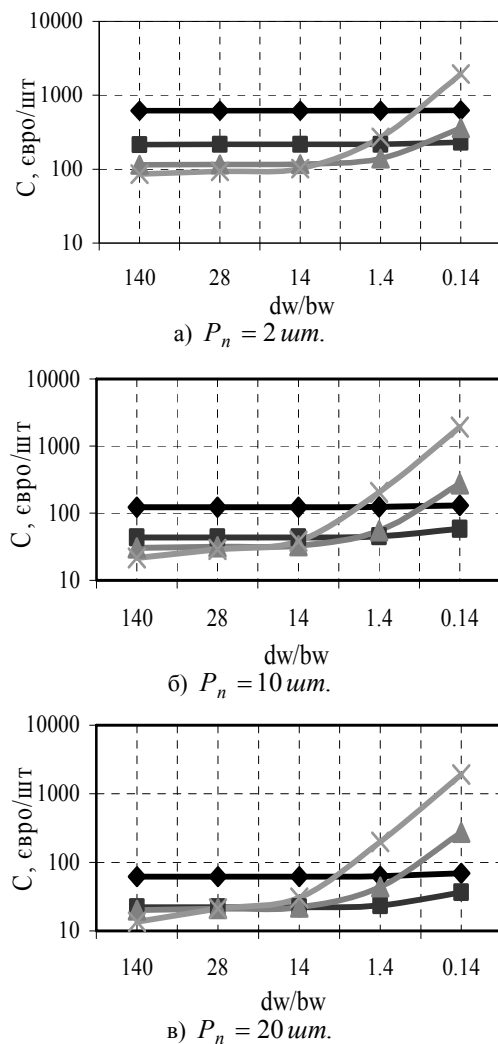


Рисунок 2 – Залежність собівартості зубообробки від співвідношення діаметру деталі до ширини вінця при різних розмірах партій і при різних методах обробки:

♦ – черв'ячна; ■ – модульна; ▲ – дискова; × – пальцева фреза

Загалом встановлено, що при виготовленні деталей з періодичними профілями середньої довжини $d_w/b_w = 0,5..20$ і розмірах партій $P_n = 1..20 \text{ шт.}$ даний спосіб обробки є не лише альтернативою традиційним процесам обробки (зубофрезерування черв'ячними, профільними і кінцевими фрезами), але й дозволяє значно знизити собівартість виготовлення деталей такого типу.

Більш чітко спостерігається економічна доцільність застосування контурної обробки дисковими фрезами у порівнянні з традиційними методами обробки, коли необхідно є висока гнучкість виробництва деталей з періодичним профілем, наприклад, при почерговій обробці чотирьох різних деталей з відмінними періодичними профілями – трьох евольвентних зубчастих коліс різного модуля m і кількості зубів z (рисунки 3, а, б і в) і одного цівкового зубчастого колеса для цівки радіусом r_u і кількості зубів z (рисунки 3, г).

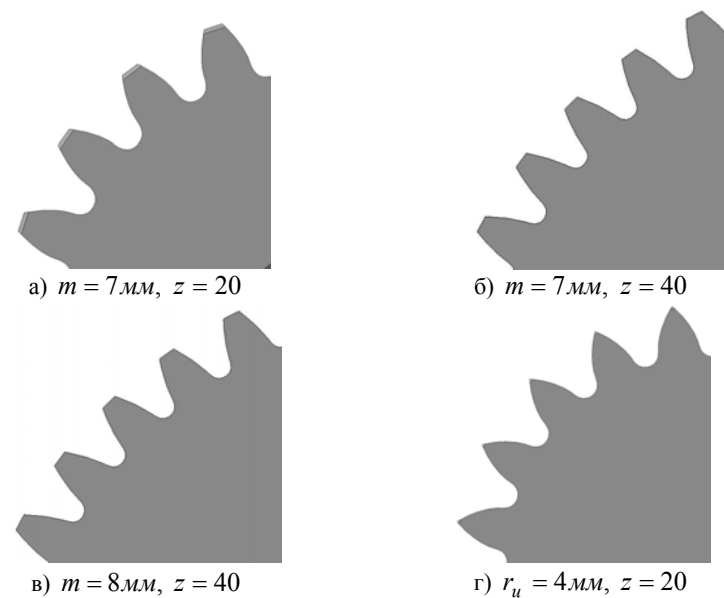


Рисунок 3 – Оброблювальні деталі з періодичним профілями (а, б, в – евольвентні зубчасті колеса; г – цівкове колесо)

Для наведеного прикладу за формулою (6) було розраховано середню собівартість обробки однієї деталі при різних методах обробки. При цьому основними затратами, які у кінцевому результаті найбільше вплинули на собівартість обробки, виявилися основний час обробки і вартість інструменту.

І хоча, з одного боку, основний час обробки t_o одного періодичного профілю (у даному випадку зуба) при одній і тій же швидкості різання $v_c = 250 \text{ м/хв}$ при контурній обробці виявився від 20 до 100 разів довшим, ніж при обкаті чи копію-

ванні (рисунок 4, а), що пов'язано зі складною кінематикою формоутворення, більшою довжиною робочих ходів і невисокою жорсткістю інструмента, яка не дозволяє інтенсифікувати процес контурної обробки. А з іншого боку, затрати на інструмент виявились від 15 до 50 разів меншими (рисунок 4, б), що зумовлено високою гнучкістю контурної обробки – для обробки чотирьох заданих деталей методом обкату потрібно три різні черв'ячні фрези, а методом копіювання, навіть, чоти-

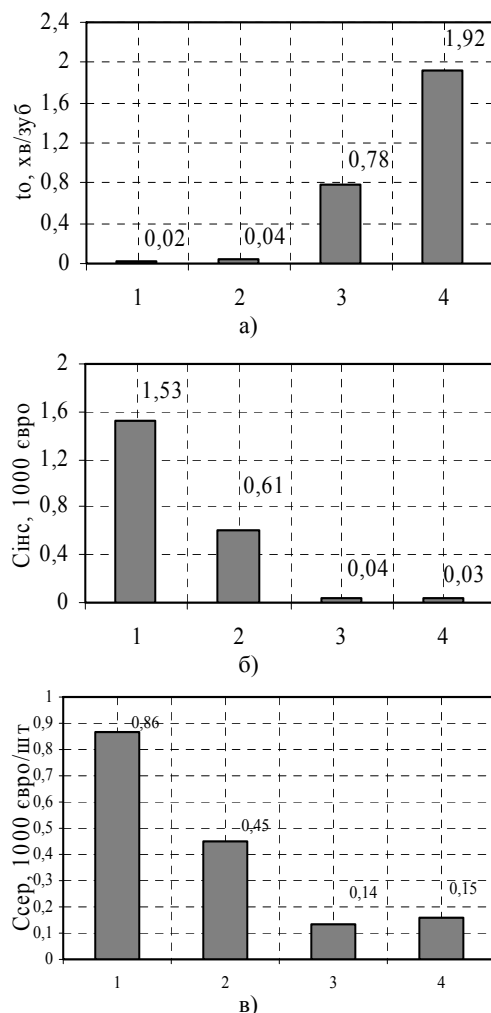


Рисунок 4 – Основний час обробки одного зуба (а), середні затрати на інструмент (б) і середня собівартість зубообробки при різних методах обробки:
1 – черв'ячна; 2 – модульна; 3 – дискова; 4 – пальцева фреза

ри різні модульні фрези, у той час, коли при контурній обробці достатньо одного і того ж інструмента. У кінцевому результаті, середня собівартість виготовлення однієї деталі при контурній обробці виявилась у 3-6 разів нижчою, ніж при традиційних методах обробки (рисунок 4, в). Це, у свою чергу, дозволяє в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва отримати неабияку економічну вигоду.

Висновки.

1. Отримані результати техніко-економічно розрахунку і порівняння собівартості обробки деталей з періодичними профілями різними методами обґрунтовують економічну доцільність упровадження на виробництві контурної обробки дисковими фрезами.

2. Встановлені оптимальні для даного методу обробки розміри оброблюваних деталей з періодичним профілем ($d_w / b_w = 0,5..20$), а також розміри їх партій ($P_n = 1..20 \text{ шт}$) визначають певну нішу ринку виробництва деталей такого типу, яку даний метод обробки може частково або повністю зайняти, витіснивши при цьому традиційні методи обробки. Зокрема, це стосується виробництва крупно-модульних зубчастих коліс великого діаметру, для якого власне характерними є малий розмір партій деталей і висока ціна спеціального інструменту необхідного для їх виготовлення.

3. Значно більший економічний ефект, ніж оптимальні розміри оброблюваних деталей, а також розміри їх партій, дає висока гнучкість даного методу обробки. Це зумовлено насамперед відсутністю витрат на закупівлю нового інструменту при зміні форми і розміру оброблюваних періодичних профілів. І дозволяє при одиничному і дрібносерійному виробництві уже при виготовленні четвертої деталі з іншим періодичним профілем знизити собівартість обробки у 3-6 разів і отримати значну вигоду.

Список літератури: 1. Коганов И.А. Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей. – Тула: Приокское книжн. из-во, 1970. – 180с. 2. Данильченко Ю.М., Пастернак С.І. та ін. Кінематика формоутворення циліндричних зубчастих коліс з заданим профілем дисковим інструментом // Вестник НТУУ "Киевский политехнический институт", сер. Машиностроение. – 2005. – № 46. – С. 104-108. 3. Данильченко Ю.М., Пастернак С.І. та ін. Математичне моделювання законів руху дискового інструменту при обробці зубчастих коліс довільного профілю // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. – 2006. – №49. – С. 112-118. 4. Пастернак С.І., Данильченко Ю.М. та ін. Контурна обробка зубчастих коліс з довільним профілем зубів дисковими інструментами // Матеріали доповідей Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Прогресивні напрями розвитку машино-приладобудівних галузей та транспорту". – Севастополь: В-во СевНТУ, 2007. – С. 90-91. 5. Данильченко Ю.М., Пастернак С.І., та ін. Продуктивність контурної обробки зубчастих ланок дисковим інструментом // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. – 2008. – №53. – С. 215-225. 6. Бикитимов Р., Гречинников В., и др. Управление качеством, персоналом и логистика в машиностроении: Учебное пособие. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2005 – 256с. 7. Овумян Г.Г., Адам Я.И. Справочник зубореза – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1983 – 223с. 8. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. – М.: Экономика, 1990. – Ч. I-II.

Надійшла в редакцію 30.04.09